

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Výroba šperků 3D tlačou technologií SLA

Jewelry 3D printing applications

Študent:

Jakub Brezina

Vedúci práce:

Ing. Marek Pagáč, Ph.D.

Ostrava 2020

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Zadání bakalářské práce

Student: **Jakub Brezina**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2303R002 Strojírenská technologie
Téma: Výroba šperků 3D tiskem technologií SLA
Jewelry 3D Printing Applications
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod.
2. Současný stav.
3. Návrh technologického postupu výroby šperků technologií SLA.
4. Technické zhodnocení.
5. Závěr.

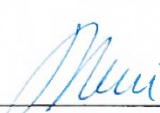
Seznam doporučené odborné literatury:


DOBBS, Sarah et al. SB LTD. *The Ultimate Guide To 3D Printing*. London: Dennis Publishing Ltd, 2014, 48 s. ISBN 1-78106-309-5.
GIBSON, I., D. W ROSEN a B. STUCKER. *Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing*. New York: Springer, c2010. ISBN 1441911200.
BATEMAN, Rob a Richard OLSSON. *The essential guide to 3D in Flash*. Berkeley. California: Friends of Ed, [2010]. ISBN 978-1-4302-2542-6.
Formlabs. Materials - Jewelry. <https://formlabs.com/materials/jewelry/>

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Marek Pagáč, Ph.D.**

Datum zadání: 20.12.2019
Datum odevzdání: 18.05.2020


doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
vedoucí katedry


prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty



12.02.2020

Pan
Jakub Brezina
nar. 17. 8. 1998
Kornica 246
023 22 Klokotčov

vsboes7a30acc9 Č. j.: VSB/20/004974

datum: 17. 2. 2020

vyřizuje: Ivana Sikorová DiS., tel.: 597 324 122, email: ivana.sikorova@vsb.cz

Povolení vypracovat bakalářskou práci ve slovenském jazyce

Na základě Vaší žádosti ze dne 12. 2. 2020 Vám povolují vypracovat Vaši bakalářskou práci ve slovenském jazyce.

S pozdravem


VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ
TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
Fakulta strojní
17. listopadu 21/2/15
708 00 Ostrava-Poruba -6-

prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan Fakulty strojní

Miestoprísazné vyhlásenie študenta

Prehlasujem, že som celú bakalársku prácu vrátane príloh vypracoval samostatne pod vedením vedúceho bakalárskej práce a uviedol som všetky použité podklady a literatúru.

V Ostrave dňa 18.5.2020



.....
Podpis študenta

Prehlasujem, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, že tato bakalářská práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostrave dňa 18.5.2020

Podpis autora práce

Meno a priezvisko autora práce: Jakub Brezina

Adresa trvalého pobytu autora práce: Kornica 246

ANOTÁCIA BAKALÁRSKEJ PRÁCE

BREZINA, J. Výroba šperkov 3D tlačou technológiou SLA: bakalárská práca. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2019, 77 s. Vedúci práce: Ing. Pagáč, M., Ph.D.

Témou bakalárskej práce je výroba šperku pomocou technológie SLA. V úvodnej časti sú popísané technológie SLA/DLP. V ďalšej časti práca obsahuje základné informácie k dodatočnému spracovaniu po vytlačení (post processing). Nasledujú materiály, ktoré sa najčastejšie používajú pre SLA tlač.

V ďalšej časti sa práca zaoberá už praktickým riešením a postupom pri navrhovaní experimentu. V poslednej časti sa nachádza zhrnutie a vyhodnotenie vytlačeného experimentu.

ANNOTATION BACHELOR THESIS

BREZINA, J. Jewelry 3D printing applications: Bachelor thesis. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining, Assembly and engineering metrology, 2019, 77 p. Supervisor: Ing. Pagáč, M., Ph.D.

The theme of the Bachelor thesis is the production of jewelry using SLA technology. The introductory part describes the technologies SLA / DLP. In the next section, the thesis contains basic information for post-processing. The following are the materials most commonly used for SLA printing.

In the next part the work deals with practical solution and procedure in designing the experiment. The last section summarizes and evaluates the printed experiment.

OBSAH

Zoznam skratiek	9
Zoznam tabuliek	10
Zoznam obrázkov	11
Úvod	12
1 TECHNOLÓGIA SLA/DLP.....	13
1.1 SLA.....	14
1.1.1 Proces tlače SLA	14
1.1.2 Parametre tlačiarne SLA	16
1.1.3 SLA tlačiareň zhora nadol.....	16
1.1.4 SLA tlačiareň zdola nahor.....	17
1.2 Štruktúra podpory	19
1.3 Skrútenie	21
1.4 Adhézia vrstvy	21
2 POST PROCESSING.....	22
2.1.1 Základné odstránenie podpory	22
2.1.2 Brúsené podporné hroty	22
2.1.3 Mokré brúsenie.....	22
2.1.4 Povrchová úprava minerálnym olejom	23
2.1.5 Sprejová farba (číry ochranný akrylát UV).....	23
2.1.6 Leštenie na priehľadný povrch.....	23
3 MATERIÁLY SLA	25
4 EXPERIMENT	28
4.1 Tlačiareň Formlabs Form 3.....	28
4.2 Návrh a realizácia modelu	30
4.2.1 Preprocessing	31
4.2.2 Processing	35
4.2.3 Postprocessing.....	39
5 ZÁVER.....	46
6 ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY	49

ZOZNAM SKRATIEK

Skratka	Význam	Jednotka
SLA	Stereolitografia (Stereolithography)	
DLP	Procesy priameho svetla (Direct Light Processes)	
UV	Ultrafialové	
FDM	Modelovanie taveného nanášania (Fused Deposition Modeling)	
SLS	Selektívne laserové spekanie (Selective Laser Sintering)	
USB	Univerzálna sériová zbernica (Universal Serial Bus)	
IP	Internetový protokol (Internet Protocool)	
CAD	Návrh pomocou počítača (Computer Aided Design)	
IPA	Isopropanol (Isopropylalcohol)	
RP	Rýchle prototypovanie (Rapid Prototyping)	
DDM	Priama digitálna výroba (Direct Digital Manu- facturing)	
3D	Trojrozmerný (3 Dimensional)	
LFS	Nízko silová stereolitografia (Low Force Ste- reolithography)	

ZOZNAM TABULIEK

Tabuľka 1 Porovnanie tlačiarňí SLA zdola nahor, SLA zhora nadol [1]	18
Tabuľka 2 Výhody a nevýhody základných procesov postprocessingu [3]	24
Tabuľka 3 Prehľad a rozdelenie dostupných materiálov SLA [4]	25
Tabuľka 4 Výhody a nevýhody najbežnejšie používaných živíc [1]	27
Tabuľka 5 Technické parametre Formlabs Form 3 [12]	29
Tabuľka 6 Technické parametre odlievateľnej voskovej živice [6]	31

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obrázok 1 Schéma tlačiarne SLA [1]	15
Obrázok 2 Proces 3D tlače SLA [1]	15
Obrázok 3 Schéma tlačiarne SLA zhora nadol [1].....	16
Obrázok 4 Schéma tlačiarne SLA zdola nahor [1].....	17
Obrázok 5 Tlačiareň SLA zdola nahor (minimalizácia podpory) [1].....	19
Obrázok 6 Tlačiareň SLA zdola nahor (minimalizácia prierezovej plochy) [1]	20
Obrázok 7 Odstránenie nosnej konštrukcie z časti SLA [1]	20
Obrázok 8 Tlačiareň Form 3 [7]	28
Obrázok 9 Schéma tlačiarne Form 3 [7]	29
Obrázok 10 Schéma výrobného postupu	30
Obrázok 11 Prvý koncept modelu	32
Obrázok 12 Vytvorenie mriežkovanej štruktúry pomocou programu Materialise Magics	33
Obrázok 13 Simulácia tlače.....	34
Obrázok 14 Finálny model pre 3D tlač	34
Obrázok 15 Pracovné prostredie softwaru PreForm.....	35
Obrázok 16 Použitý krok orientácia modelu	36
Obrázok 17 Model s automatickými podporami.....	37
Obrázok 18 Model s ručne vytvorenými podporami	37
Obrázok 19 Nahratie súboru do tlačiarne	39
Obrázok 20 Odstránenie podpôr [1]	39
Obrázok 21 Ručná čistiaca súprava Formlabs [9]	40
Obrázok 22 Čistiaca stanica Formlabs [10].....	40
Obrázok 23 Vytvrdzovacia stanica Formlabs [11].....	41
Obrázok 24 Pripojenie banky k modelu [8].....	42
Obrázok 25 Miešanie prášku a destilovanej vody [8]	42
Obrázok 26 Nalievanie zmesi do formy [8]	43
Obrázok 27 Forma na odlievanie [8]	43
Obrázok 28 Pec [8]	44
Obrázok 29 Odlievanie kovu [8]	45
Obrázok 30 Schladenie formy vo vode [8]	45

ÚVOD

Aditívna výroba je technológia, ktorá vytvára 3D objekty pomocou pridania vrstvy po vrstve materiálu, či už ide o plast, kov, betón. Za pomoci 3D softvérov na modelovanie (CAD) môžeme jednoducho pomocou vytvorenia náčrtu si softvér pre aditívnu technológiu načíta súbor vo formáte .STL, .STEP a vyhodnotí si potrebné údaje pre stanovanie výšky vrstvy, koľko materiálu sa spotrebuje pri danej tlačovej úlohe a ďalších dôležitých parametrov pre úspešné vytvorenie 3D objektu.

Aditívna výroba zahŕňa množstvo technológií vrátane podskupín, ako sú 3D tlač, rýchle prototypovanie (RP), priama digitálna výroba (DDM), vrstvená výroba a výroba aditív. Možnosti, ktoré aditívna výroba ponúka v súčasnej dobe neustále narastajú, ako v leteckom priemysle, zdravotníctve (tlač implantátov, vedci sa pokúšajú vytvárať orgány pomocou biokompatibilných materiálov, ktoré neškodia zdraviu a sú plne funkčné).

Veľkou výhodou 3D tlače je v dnešnej dobe dobrá cenová dostupnosť, znižovanie nákladov na výrobu oproti konvenčným technológiám, efektívna výroba rôznych prototypov, dosiahnutie požadovaných presností a tvarov, ktoré by sme bežnou cestou nikdy nedosiahli.

Tému 3D tlač som si zvolil jednak z vyššie uvedených výhod, ale aj z dôvodu veľkej perspektívy vytvárania objektov pomocou SLA technológie, využitie najmodernejších technológií a vďaka širokej škále materiálov, ktoré je možno použiť len vďaka aditívnej výrobe.

Práca sa zaoberá výrobou šperku pomocou technológie SLA, ktorá v dnešnej dobe je jednou z najpopulárnejších a najrozšírenejších spomedzi všetkých technológií, ktoré sa používajú pre aditívnu výrobu. Technológia SLA ponúka širokú škálu materiálov, vďaka tomu som sa rozhodol použiť odlievateľnú živicu ako materiál, pre vytvorenie šperku z kovu.

Cieľom práce bolo poukázať na výhody a nevýhody technológie SLA, využitie tlačiarň a technológie v strojnom priemysle, využitie materiálov a rôzne aplikácie s nimi, ďalej zdôrazniť dôležitý faktor pri 3D tlači a to je dodatočné spracovanie (post processing).

1 TECHNOLÓGIA SLA/DLP

Technológia aditívnej výroby podľa normy

Aditívna výroba sa člení do 7 výrobných procesov podľa princípu technologického postupu výroby. Norma ISO/ASTM 52900:2015 Additive Manufacturing – General Principles – Terminology ju klasifikuje fotopolymerizáciu takto:

Fotopolymerizácia (Vat Photo-polymerization) – fotopolymerná kvapalina v nádobe je vrstva po vrstve vytvrdzovaná polymeračným svetlom; zdrojovým materiálom pre vytvrdzovanie je živica.

Stereolitografia (SLA) a 3D tlač s digitálnym spracovaním svetla (DLP) sú dva najpoužívanejšie procesy pre živicovú 3D tlač. Živicové 3D tlačiarne sú populárne produkciou vysoko presných, izotropných a vodotesných prototypov a súčastí v rade pokrokových materiálov s jemnými vlastnosťami a hladkým povrchom.

Technológie SLA a DLP boli v minulosti zložité a cenovo nedostupné, súčasné malé stolné 3D tlačiarne SLA a DLP -produkujú diely v priemyselnej kvalite za dostupnú cenu a s bezkonkurenčnou univerzálnosťou vďaka širokej škále materiálov.

Proces technológie SLA a DLP spočíva v tom, že kvapalná živica je selektívne vystavovaná svetelnému zdroju - SLA laser, DLP projektor - vytvárajú veľmi tenké pevné vrstvy, ktoré sa navrhujú a vytvárajú pevný objekt. Pričom tieto technológie sú v princípe veľmi blízke, môžu zhotovovať výrazne odlišné výstupy. [2]

1.1 SLA

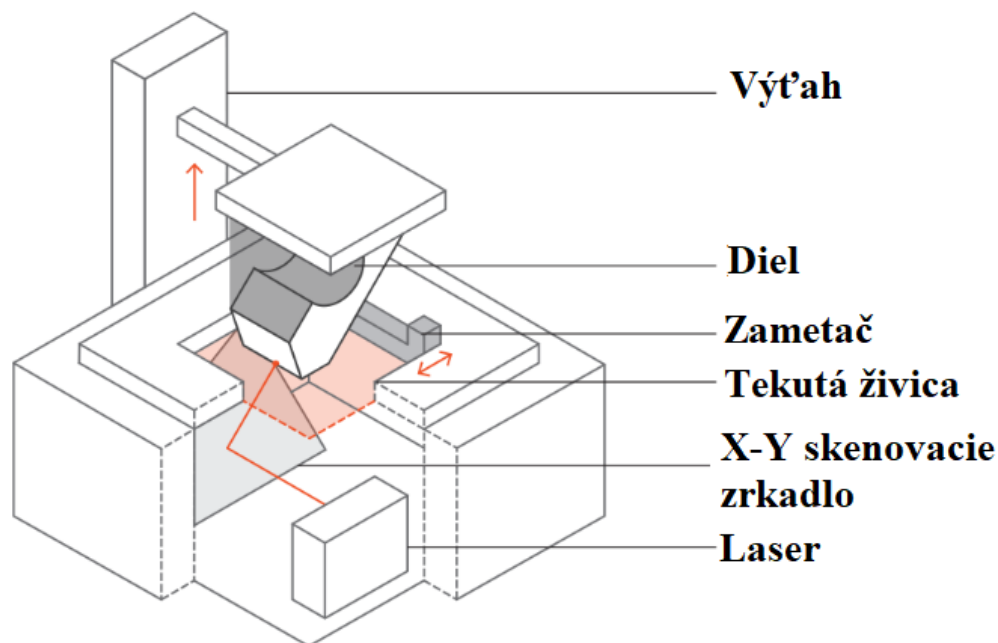
SLA – Stereolitografia je výrobný proces aditív, ktorý patrí do skupiny Vat fotopolymérizácií. V technológii SLA sa objekt vytvára selektívnym vytvrdzovaním vrstvy po vrstve polymérnej živice pomocou ultrafialového (UV) laserového lúča. Materiály, ktoré sú použité v SLA sú fotocitlivé termosetové polyméry, ktoré prichádzajú v kvapalnej podobe. [1]

1.1.1 Proces tlače SLA

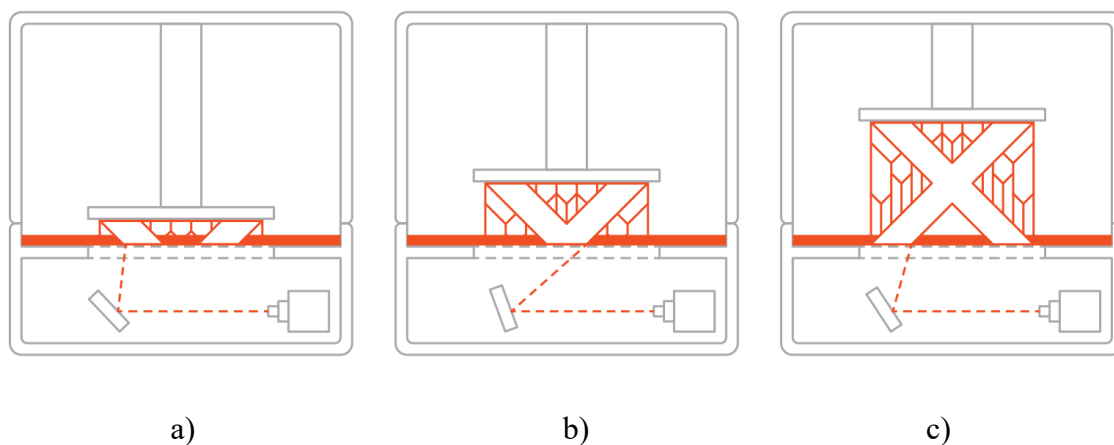
1. Stavebná platforma sa najskôr umiestni do nádrže s kvapalným fotopolymérom vo vzdialenosti jednej výšky vrstvy od povrchu kvapaliny. [1]
2. UV laser vytvorí ďalšiu vrstvu selektívnym vytvrdením a stuhnutím fotopolymérnej živice. Laserový lúč je zameraný na vopred stanovenú dráhu pomocou sady zrkadiel, tzv. galvanometrov. Naskenuje sa celá prierezová plocha modelu, takže vyrobený diel je úplne pevný. [1]
3. Po dokončení vrstvy sa platforma pohybuje v bezpečnej vzdialenosti a zamečtač povrch opätovne natiera. Proces sa potom opakuje, až kým sa diel nedokončí. [1]
4. Po tlači je diel v úplne nevytvrdenom stave a vyžaduje sa ďalšie dodatočné spracovanie pod UV svetlom, ak sú potrebné veľmi vysoké mechanické a tepelné vlastnosti. [1]

Kvapalná živica stuhne procesom nazývaným fotopolymérizácia: počas tuhnutia sú monomérmne uhlíkové reťazce, ktoré tvoria kvapalnú živicu, aktivované svetlom UV lasera a stávajú sa tuhými, čím sa vytvárajú silné nerozbitné väzby medzi sebou. [1]

Fotopolymérizačný proces je nezvratný a neexistuje žiadny spôsob, ako previesť SLA časti naspäť na ich kvapalnú formu. Materiály, ktoré sa vyrábajú so SLA, sú vyrobené z termosetových polymérov, na rozdiel od termoplastov, ktoré používa FDM. [1]



Obrázok 1 Schéma tlačiarne SLA [1]



Obrázok 2 Proces 3D tlače SLA [1]

- Stavebná platforma je ponorená do živicovej nádrže, kde zametač rozotiera živicu po celej živicovej nádrži a za pomoci laseru a X-Y skenovacieho zrkadla a stavia vrstvu po vrstve materiálu daný objekt.
- Stavebná platforma sa postupne vďaka výťahu, na ktorom je uchytená, posúva smerom nahor a laser s X-Y skenovacím zrkadlom sa pohybuje zľava doprava a stavia daný objekt.
- Stavebná platforma je vo finálnej fáze tlače, ostávajú posledné vrstvy materiálu a vytlačený objekt je postavený zhora nadol.

1.1.2 Parametre tlačiarne SLA

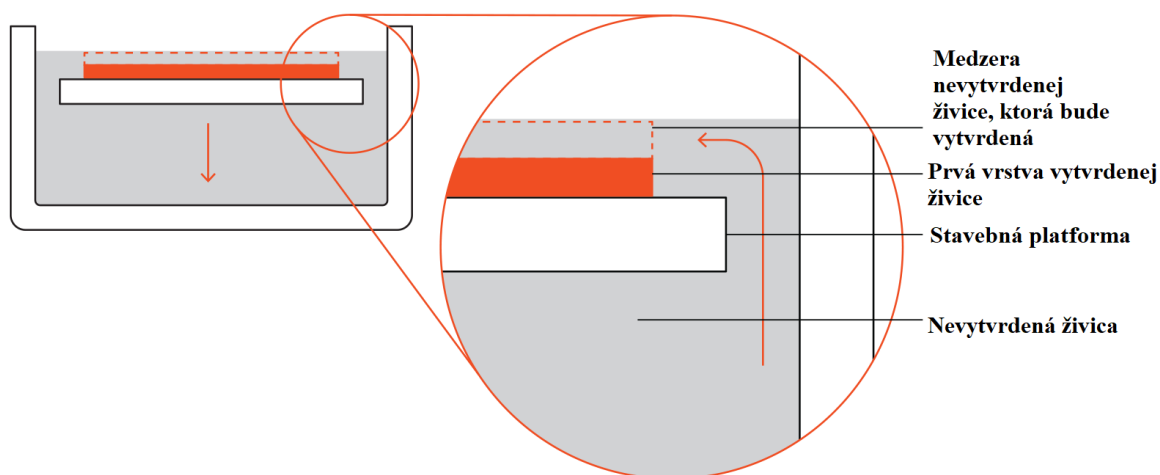
Stolné 3D SLA tlačiarne obsahujú nádrž na živicu s priehľadnou základňou a nepriľnavým povrchom, ktorá slúži ako podklad pre vytvrdzovanie tekutej živice, čo umožňuje jemné oddelenie novovytvorených vrstiev. [1]

V SLA sa typická výška vrstvy pohybuje v rozmedzí 25 až 100 mikrónov. Presnejšie zakrivené geometrie zachytávajú výšky nižšej vrstvy, ale zvyšujú čas zostavenia (a náklady) a pravdepodobnosť zlyhania tlače. Výška vrstvy 100 mikrónov je vhodná pre najbežnejšie aplikácie. [1]

Veľkosť zostavy je taktiež ďalším parametrom, ktorý je dôležitý pre dizajnéra. Od typu tlačiarne SLA závisí veľkosť zostavy. Existujú dve hlavné nastavenia tlačiarne SLA: orientácia zhora nadol a orientácia zdola nahor. [1]

1.1.3 SLA tlačiareň zhora nadol

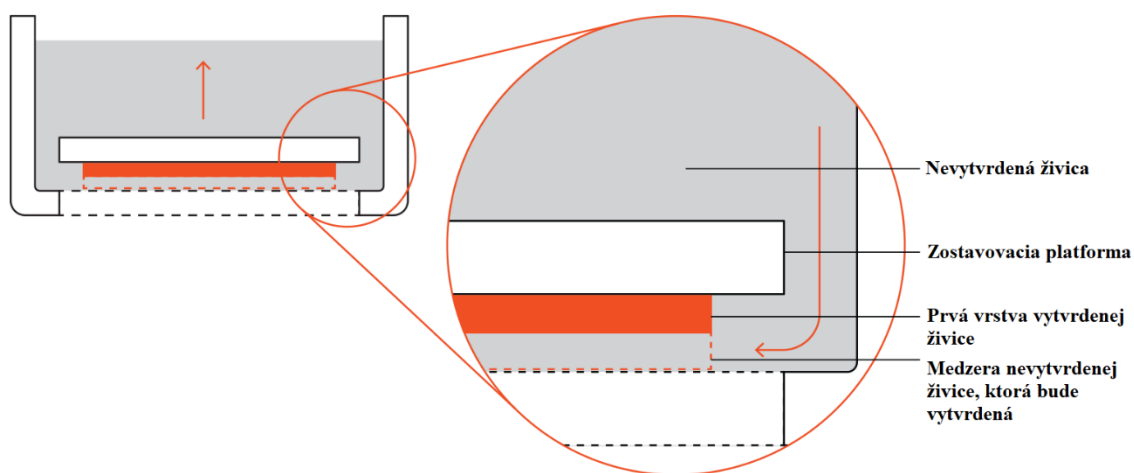
SLA tlačiarne zhora nadol umiestňujú zdroj lasera nad nádrž a časť je postavená nahor. Stavebná platforma začína na úplnom vrchu živicovej nádrže a po každej vrstve sa pohybuje nadol. [1]



Obrázok 3 Schéma tlačiarne SLA zhora nadol [1]

1.1.4 SLA tlačiareň zdola nahor

SLA tlačiarne zdola nahor umiestňujú zdroj svetla pod nádrž na živicu a diel je postavený opačne. Nádrž má priehľadné dno so silikónovým povlakom, ktorý umožňuje, aby svetlo lasera prechádzalo, pričom bráni vytvrdenej živici v tom, aby sa k nej prilepila. Po každej vrstve sa vytvrdená živica oddelí od spodnej časti nádrže, keď sa stavebná platforma pohybuje nahor. Toto sa nazýva odlupovací krok. [1]



Obrázok 4 Schéma tlačiarne SLA zdola nahor [1]

Orientácia zdola nahor sa využíva najmä v stolných tlačiarniach, napr. firma Formlabs, zatiaľ čo zhora nadol sa všeobecne využíva v priemyselných systémoch SLA. Tlačiarne SLA zdola nahor sa ľahšie vyrábajú a prevádzkujú, ale ich veľkosť je obmedzená, pretože sily, ktoré pôsobia na dielec počas kroku odlupovania, môžu spôsobiť zlyhanie tlače. Tlačiarne zhora nadol sa môžu zväčšovať až do veľmi veľkých rozmerov zostavy bez veľkej straty presnosti. Pokročilé možnosti týchto systémov prichádzajú s vyššími nákladmi. [1]

Tabuľka 1 Porovnanie tlačiarňí SLA zdola nahor, SLA zhora nadol [1]

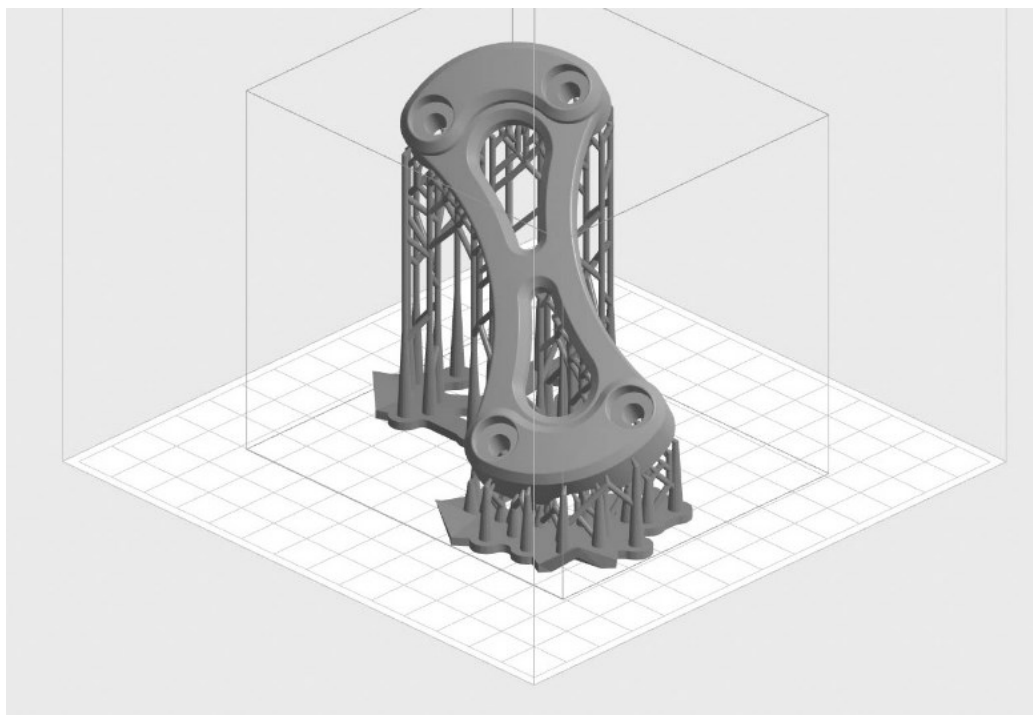
	SLA zdola nahor	SLA zhora nadol
Výhody	+ Nižšia cena, + Široko dostupné	+ Veľmi veľká veľkosť zostavy, + Rýchlejšie zostavenie
Nevýhody	– Malá veľkosť, – Menší sortiment materiálu, – Vyžaduje sa ďalšie spracovanie po rozsiahlom využití podpory	– Vyššie náklady, – Vyžaduje špecializovaného operátora, – Výmena materiálu spočíva vo vyprázdnení celej nádrže
Veľkosť zostavy	Až do 145 x 145 x 175 mm	Až do 1500 x 750 x 500 mm
Typická výška vrstvy	25 až 100 mikrónov	25 až 150 mikrónov
Presnosť rozmerov	± 0,5% (dolná hranica: ± 0,010 – 0,250 mm)	± 0,15% (dolná hranica ± 0,010 – 0,030 mm)

1.2 Štruktúra podpory

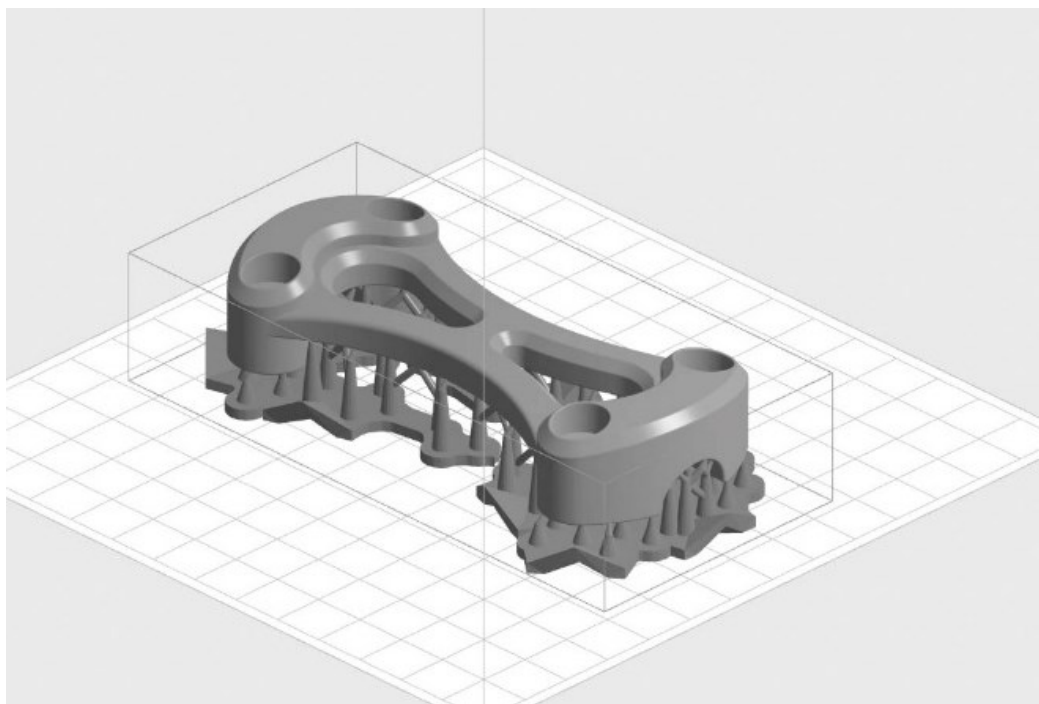
Podpory sú vždy požadované v technológii SLA. Podpory sú vytlačené z toho istého materiálu ako diel a po tlači sa musia ručne odstrániť. Orientácia časti určuje umiestnenie a výšku podpory. Odporúča sa, aby bol diel orientovaný tak, aby vizuálne kritické povrchy neprišli do kontaktu s podporami. [1]

V tlačiarňach SLA zhora nadol sú požiadavky na podpory podobné FDM. Sú potrebné na tlač presných previsov a mostov (kritický uhol presahu je zvyčajne 30°). Diel môže byť orientovaný v akejkoľvek polohe a obvykle je tlačený na plocho, aby sa minimalizovala veľkosť podpory a celkový počet vrstiev. [1]

V tlačiarňach SLA zdola nahor sú veci zložitejšie. Previsy a mosty je potrebné navyše podoprieť, ale najdôležitejším kritériom je minimalizácia plochy prierezu každej vrstvy. Sily pôsobiace na diel počas kroku odlupovania môžu spôsobiť jeho odpojenie od stavebnej platformy. Tieto sily sú úmerné ploche prierezu každej vrstvy. Z tohto dôvodu sú časti orientované v uhle a zníženie podpory nie je primárnym problémom. [1]



Obrázok 5 Tlačiareň SLA zdola nahor (minimalizácia podpory) [1]



Obrázok 6 Tlačiareň SLA zdola nahor (minimalizácia prierezovej plochy) [1]



Obrázok 7 Odstránenie nosnej konštrukcie z časti SLA [1]

1.3 Skrútenie

Jedným z najväčších problémov súvisiacich s presnosťou dielov vyrobených pomocou SLA je skrútenie. Skrútenie je podobný deformácii v FDM. Počas tuhnutia alebo tvrdnutia sa živica po vystavení svetelnému zdroju tlačiarne mierne zmršťuje. Ak je zmrštenie značné, medzi novou vrstvou a predtým stuhnutým materiálom sa vyvíja veľké vnútorné napätie, ktoré vedie k zvlneniu dielu. [1]

1.4 Adhézia vrstvy

Tlačené časti v SLA majú izotropné mechanické vlastnosti. Je to preto, že jediný prechod UV laserom nestačí na úplné vytvrdenie tekutej živice. Neskoršie laserové prechody pomáhajú skôr spevneným vrstvám spojiť sa vo veľmi vysokej miere. V SLA vytvrdzovanie pokračuje aj po dokončení procesu tlače. [1]

Pre dosiahnutie najlepších mechanických vlastností je potrebné SLA diely dodatočne vytvrdiť ich umiestnením do vytvrdzovacej pece pod intenzívnym UV svetlom (a niekedy aj pri zvýšenej teplote). To výrazne zlepšuje tvrdosť a teplotnú odolnosť časti SLA, ale stáva sa krehkejšou. [1]

Skúšobné vzorky dielov tlačených v štandardnej priehľadnej živici pomocou stolnej SLA tlačiarne plochy majú takmer 2 krát väčšiu pevnosť v ťahu (65 MPa v porovnaní s 38 MPa), a môžu pracovať pri zaťažení pri vyšších teplotách (pri max teplote 58°C v porovnaní so 42°C), ale ich predĺženie pri pretrhnutí je takmer polovičné (6,2 % v porovnaní s 12 %). [1]

Dlhodobé vystavenie UV žiareniu má nepriaznivý vplyv na fyzikálne vlastnosti a vzhľad časti SLA. Môžu sa krútiť, stať sa veľmi krehkými a zmeniť farbu. Z tohto dôvodu sa pred použitím odporúča striekanie s čírym akrylovým náterom UV. [1]

2 POST PROCESSING

SLA je schopná vytvárať predmety s jemnými detailmi a vlastnosťou už od 0,3 mm. Najväčšou nevýhodou tejto technológie je to, že časti sú často malé a väčšina výtlačkov musí byť orientovaná pod uhlom a vyžaduje, aby sa k modelu pripevnili podporné štruktúry. Tieto podpery zanechávajú stopy na povrchu a vytvárajú nerovnaké povrchy. Väčšina SLA živíc je jedným z najjednoduchších 3D tlačných materiálov na spracovanie. [3]

2.1.1 Základné odstránenie podpory

Nosná konštrukcia je odlomená alebo odrezaná z modelu, pričom na povrchoch v kontakte s podkladovým materiálom zostáva nerovný povrch. Ak sa vyžaduje kvalitná povrchová úprava, prídanie dodatočného materiálu (najmenej 0,1 mm), ktorý sa má následne obrúsiť, umožňuje lepšiu rozmerovú presnosť. Je to vhodné pre všetky živice SLA. [3]

2.1.2 Brúsené podporné hroty

Iba malé podporné hroty sa brúsia. Tento proces je vhodný pre rovné povrchy, kde je ľahké posúdiť, že povrch je rovný. Pretože povrch je brúsený iba na nosných hrotoch, celková geometria častí je vo všeobecnosti nedotknutá. Je vhodné pre všetky živice SLA. [3]

2.1.3 Mokrú brúsenie

Mokrú brúsenie všeobecne dosahuje najhladšiu povrchovú úpravu (v závislosti od počtu použitých stupňov brúsneho papiera). Na nepodporovanej strane modelu je potrebné brúsiť iba stavebné línie. To je zvyčajne možné dosiahnuť pomocou jediného vysoko kvalitného brúsneho papiera (nie je potrebné odstupňovanie), čo robí povrch lacnejším. Podporovaná strana je náročnejšia na pracovnú silu, zvyčajne si vyžaduje najmenej 4 stupne brúsneho papiera. Preto je najlepšou praxou umiestňovať podpery na najmenej viditeľnú časť modelu. V závislosti od umiestnenia podpery môže dôjsť k určitej strate presnosti pri odstraňovaní materiálu počas procesu brúsenia. Je vhodné pre všetky živice SLA. [3]

2.1.4 Povrchová úprava minerálnym olejom

Táto povrchová úprava je podobná povrchovej úprave brúsenej za mokra, s výnimkou vrstvy minerálneho oleja pridanej po procese brúsenia. Minerálny olej pomáha skryť biele / svetlé škvrny na modeli a vytvára tak pekný rovnomerný povrch. Je vhodné pre všetky živice SLA. Táto povrchová úprava je vhodná pre mechanické časti, ktoré znižujú trenie a mazajú povrch. [3]

2.1.5 Sprejová farba (číry ochranný akrylát UV)

Maľovanie rozprašovaním modelu pomáha zakryvať čiary vrstiev, čím sa znižuje potreba brúsenia nepodporovanej strany modelu. Lak tiež chráni model pred žltnutím a následným vytvrdzovaním obmedzením vystavenia UV žiareniu. [3]

Akrylová farba neprilne dobre k pružnej živici. Ak flexibilná živica potrebuje lesklý povrchový náter s tenkou vrstvou živice, môže to dosiahnuť vulkanizácia pod vodou, to však dramaticky ovplyvní tolerancie a detaily. Je vhodný pre všetky živice SLA. [3]

2.1.6 Leštenie na priehľadný povrch

Povrch je brúsený pomocou zvýšených hladín brúsneho papiera (na záver so zrnitosťou 2000). Povrch sa potom vyleští leštiacou hmotou. Výsledkom je najčistejší povrch, ktorý je možné, ale je to časovo náročné a možné len na povrchoch, ktoré sa dajú ľahko obrúsiť. [3]

Táto povrchová úprava je vhodná pre jednoduché tvary s niekoľkými detailmi (ako napríklad kryštál hodínok). Je menej vhodný pre modely, ktoré potrebujú zreteľný povrch na oboch stranách so zložitými geometriami, ako sú rebrá a malé priestory. [3]

Táto povrchová úprava nemusí byť vhodná pre tvrdé a ohybné živice, pretože sú mäkšie ako ostatné živice. Je vhodné pre číru živicu. Môže sa použiť na technické a farebné živice, ale zvyčajne to nie je potrebné. [3]

Tabuľka 2 Výhody a nevýhody základných procesov postprocessingu [3]

Postprocessing	Výhody	Nevýhody
Základné odstránenie podpory	<ul style="list-style-type: none"> + Poskytuje zákazníkovi úplnú kontrolu nad povrchom + Pre kritické priemery zvislých otvorov sa odporúča vrtanie po tlači, ak je požadovaná vysoká presnosť. + Najvyššia presnosť, pretože celková geometria sa nezmení 	<ul style="list-style-type: none"> – Nie je esteticky príjemný – Vysoká úroveň zručností potrebných na dosiahnutie čistého povrchu
Brúsené podporné hroty	<ul style="list-style-type: none"> + Presný povrch (dáva geometriu, ktorá je blízko 3D modelu) + Výsledný matný povrch skryje nedokonalosti 	<ul style="list-style-type: none"> – Môže viesť k nerovným povrchom na strane, na ktorej bola umiestnená podpera (kvôli nerovnomernému brúseniu) – Nie je esteticky pekný (najmä na priehľadnej živici)
Mokrú brúsenie	<ul style="list-style-type: none"> + Vynikajúci hladký povrch + Ideálne pre zložité geometrie + Najlepšia príprava povrchu na maľovanie 	<ul style="list-style-type: none"> – Nižšia presnosť na podporovanej strane – Voda použitá pri brúsení môže mať za následok niektoré biele / svetlé škvrny na výtlačku
Povrchová úprava minerálnym olejom	<ul style="list-style-type: none"> + Výsledkom je polopriehľadný povrch pre čisté živice 	<ul style="list-style-type: none"> - Farba neprilnavie dobre k povrchu
Sprejová farba (čirý ochranný UV akrylát)	<ul style="list-style-type: none"> + Čirý povrch na zložitých geometriách pre čire živice + Poskytuje ochranu pred UV žiarením 	<ul style="list-style-type: none"> – Výsledkom je zvyčajne efekt „pomarančovej kôry“ na povrchu – Zvyšuje celkové rozmery – Nie je vhodný na posuvné alebo pohyblivé časti
Leštenie na priehľadný povrch	<ul style="list-style-type: none"> + Čirý povrch + Veľmi hladký povrch 	<ul style="list-style-type: none"> – Pracovne náročné – Pri zložitých geometriách to nie je možné

3 MATERIÁLY SLA

Materiály SLA sú vo forme tekutej živice. Materiály SLA (termosety) sú krehkejšie ako materiály vyrábané pomocou FDM alebo SLS (termoplasty), a preto sa časti SLA obvykle nepoužívajú na funkčné prototypy, ktoré naň pôsobia značné zaťaženie. [1]

Jednou z najvýznamnejších výhod živicovej 3D tlače je rozmanitosť materiálov, ktoré umožňujú vytvárať súčasti pre rôzne aplikácie. Živice môžu obsahovať širokú škálu konfigurácií zloženia: materiály môžu byť mäkké alebo tvrdé, silne vyplnené sekundárnymi materiálmi, ako je sklo a keramika, alebo môžu mať mechanické vlastnosti, ako je vysoká teplota odvádzania tepla alebo odolnosť proti nárazu. [2]

Tabuľka 3 Prehľad a rozdelenie dostupných materiálov SLA [4]

Materiál	Rozdelenie	Použitie
Štandardná živica	<ul style="list-style-type: none"> - Živica s odtieňom sivej - Čistá živica - Živica pre navrhovanie 	<ul style="list-style-type: none"> - Skvelý základ pre diely, ktoré sa dodatočne spracovávajú - Výroba foriem, optika - Rýchla tlač veľkých a objemových dielov
Inžinierske živice	<ul style="list-style-type: none"> - Sivá pro živica - Tuhá živica - Elastická živica - Flexibilná živica - Živica pre vysoké teploty 	<ul style="list-style-type: none"> - Prototypovanie, formy na plasty, silikóny - Prípravky, elektrické kryty - Mäkké pružné časti, lekárske modely a pomôcky - Tvrdé flexibilné diely, spotrebný tovar, rukoväte - Vysoká tepelná odolnosť, žiaruvzdorné držiaky, kryty
Tvrdé a odolné živice	<ul style="list-style-type: none"> - Tvrdá živica - Tvrdá 1500 živica - Odolná živica 	<ul style="list-style-type: none"> - Silné a tuhé prototypy - Prototypy, ktoré sa opakovane ohýbajú a rýchlo sa vracajú do formy - Stlačiteľné prototypy

Zubné živice	<ul style="list-style-type: none"> - Modelová živica - Chirurgická živica -Zubná LT číra živica - Odlievateľná vosková živica - Šedá živica 	<ul style="list-style-type: none"> - Modely korún a mostov - Chirurgické pomôcky, vrátane šablón - Dlahy - Odlievanie krycích vrstiev - Ortodontické modely
Živice pre šperky	<ul style="list-style-type: none"> - Odlievateľná vosková živica - Odlievateľná živica - Sivá živica -Živica pre vysoké teploty 	<ul style="list-style-type: none"> - Filigránové kusy - Vytváranie vzorov foriemi - Vysoko detailné prototypovanie - Vulkanizácia gumy
Keramika		<ul style="list-style-type: none"> - Zložité geometrie

Tabuľka 4 Výhody a nevýhody najbežnejšie používaných živíc [1]

Materiál	Charakteristika
Štandardná živica	+ Hladký povrch – Relatívne krehké
Číra živica	+ Priehľadný materiál – Vyžaduje dodatočné spracovanie pre veľmi jasný povrch
Odlievateľná živica	+ Používa sa pre vytváranie vzorov foriem + Nízke percento popola po vyhorení
Tvrdá alebo odolná živica	+ Mechanické vlastnosti podobné ABS alebo PP – Nízky tepelný odpor
Živica vysokej teploty	+ Vysoká teplotná odolnosť + Používa sa na vstrekovanie a tvarovanie za tepla – Vysoká cena
Zubná živica	+ Biokompatibilný + Vysoká odolnosť proti oderu – Vysoká cena
Gumená živica	+ Gumený materiál – Nižšia rozmerová presnosť

4 EXPERIMENT

Táto kapitola sa zaoberá praktickým návrhom a postupom pre vyhotovenie šperku, parametrami pre tlačenie šperkov a procesom odlievania.

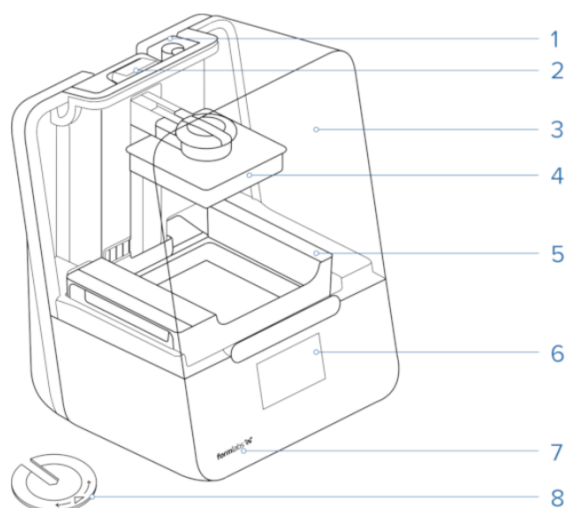
4.1 Tlačiareň Formlabs Form 3

Tlačiareň Form 3 je veľmi presná tlačiareň, kt. využíva technológiu SLA. Používa sa pre aditívnu výrobu, kde ako hlavný materiál je fotopolymerná živica.

Form 3 používa laser na vytvrdenie vrstvy živice medzi dvoma povrchmi ponorenými do živicovej nádrže v procese nazývanom vytvrdzovanie. Laser sleduje cestu vo vrstve živice určenej prierezom môjho modelu v mnohých rôznych výškach a začína v „spodnej časti“, ako sa zobrazuje v softvéri PreForm. [7]



Obrázok 8 Tlačiareň Form 3 [7]



Obrázok 9 Schéma tlačiarne Form 3 [7]

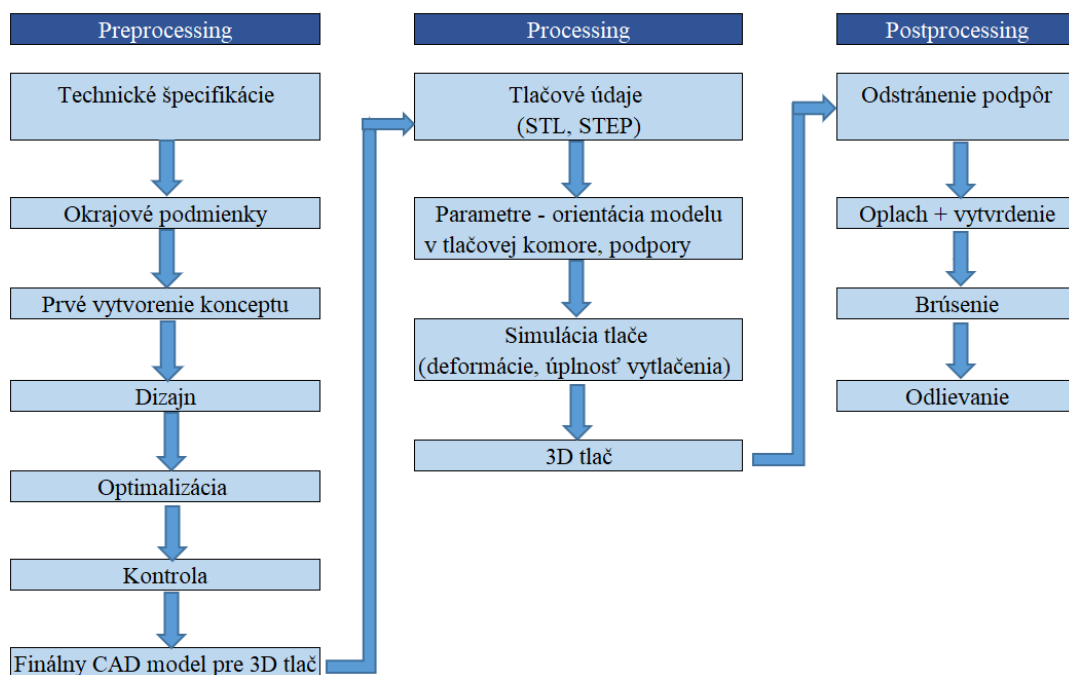
1 – živicová kazeta, 2 – stavové svetlo, 3 – veko, 4 – stavebná platforma, 5 – živicová nádrž, 6 – dotyková obrazovka, 7 – stavové svetlo, 8 – vyrovnávacia podložka

Tabuľka 5 Technické parametre Formlabs Form 3 [12]

Formlabs Form 3	
Technológia	Nízko silová stereolitografia (LFS)
Živicový systém	Automatický
Veľkosť zostavenia (šírka x dĺžka x výška)	14.5 x 14.5 x 18.5 cm
Hrúbka vrstvy (rozlíšenie osi)	25 – 300 mikrónov
XY rozlíšenie	25 mikrónov
Veľkosť laserového bodu	85 mikrónov
Živicové kazety	1
Biokompatibilné materiály	Nie (dostupné na Form 3B)
Podpory	Automaticky generované Odstránenie ľahkým dotykcom
Minimálne prístupové dimenzie (šírka x dĺžka x výška)	40.5 x 53 x 78 cm
Rozmery tlačiarne (šírka x dĺžka x výška)	40.5 x 37.5 x 53 cm
Váha	17.5 kg
Prevádzková teplota	Automatické zahrievanie na 35 °C
Ovládanie teploty	Vzduchom vyhrievaná tlačová komora

Požiadavky na napájanie	100 – 240 VAC, 2.5 A, 50/60 Hz, 220 W
Špecifikácie lasera	1 jednotka na spracovanie svetla Certifikácia EN 60825-1: 2007 Laserový výrobok triedy 1 Vlnová dĺžka 405 nm Príkon 250 mW Laserový bod 85 mikróvov
Konektivita	Wi-Fi, Ethernet, USB 2.0
Ovládanie tlačiarne	5,5 "interaktívny dotykový displej Rozlíšenie 1280 × 720
Typ súborov	Vstup súboru STL a OBJ Výstup súboru FORM
Požiadavky na systém	Windows 7 (64-bitový) a vyšší Mac OS X 10.12 a vyšší OpenGL 2.1 4 GB RAM

4.2 Návrh a realizácia modelu



Obrázok 10 Schéma výrobného postupu

4.2.1 Preprocessing

Technické špecifikácie

V pilotnej fáze navrhovania modelu bolo potrebné zvoliť materiál, ktorý sa pri výrobe bude používať a poznať všetky jeho potrebné technické špecifikácie. V prípade odlievateľnej voskovej živice sú to tieto technické špecifikácie:

1. Materiál je vhodný pre odlievanie šperkov s veľmi jemnými detailmi. [6]
2. Odlievateľná živica tlačí diely s vysokou mechanickou pevnosťou, pretože obsahuje v sebe 20 % vosku, čo umožňuje veľmi ľahkú tlač jemných a objemových modelov. Nie je nutné ďalšie vytvrdenie, čím sa zabezpečí zefektívnenie procesu a proces vyhorenia. [6]

Okrajové podmienky

Okrajové podmienky sú dôležitou súčasťou pri navrhovaní modelu, je potrebné vedieť, ako sa správa materiál pri tlačení, preto boli dohľadané technické parametre materiálu, podľa ktorých som sa riadil.

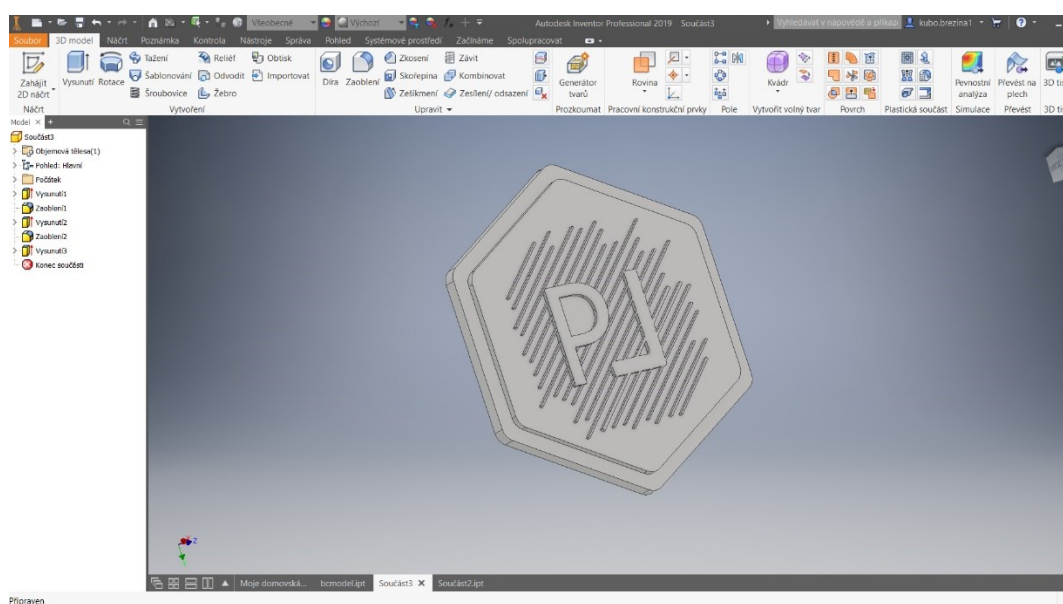
Tabuľka 6 Technické parametre odlievateľnej voskovej živice [6]

Odlievateľná vosková živica	
Farba	Fialová
Pevnosť v ťahu pri zlomení	22.5 MPa
Youngov modul	0.94 GPa
Predĺženie pri zlomení	13%
Teplota pri 5% hmotnostnej strate	249 °C
Obsah popola	0.0 – 0.1 %
Medza pevnosti v ťahu	11.6 MPa

Prvé vytvorenie konceptu

Prvým krokom pri vyhotovení experimentu bolo vymodelovanie modelu pomocou Autodesk Inventor Professional 2019 a Materialise Magics. Model je potrebný pre vloženie do softwaru PreForm od spoločnosti Formlabs.

Ďalším potrebným krokom je uloženie modelu vo formáte .STL alebo .STEP, pretože ostatné formáty nie sú podporované pre software PreForm. Pri prvej realizácii modelu bol použitý polygónový tvar, ktorý nie je konštrukčne zložitý. Skladá sa z dvoch polygónových tvarov, ktoré sú spojené v sebe. Vnútri polygónu, bolo použité logo Centra 3D tlače Protolab. Tento model bude slúžiť ako propagačný odznak na saku.



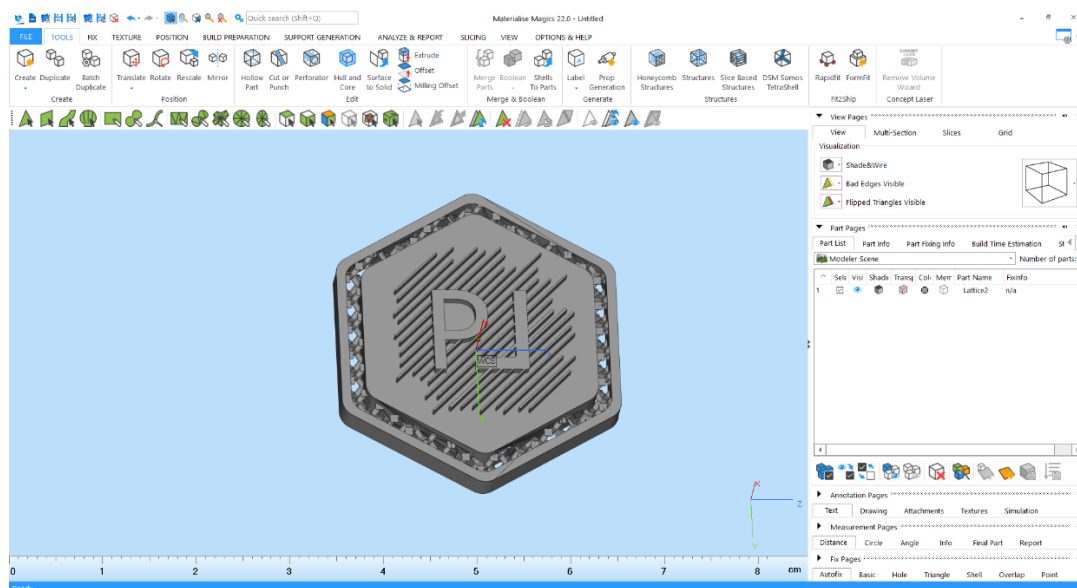
Obrázok 11 Prvý koncept modelu

Dizajn

Dizajn bol navrhnutý tak, aby sa využili výhody 3D tlače. Východiskom bol základný model, ktorý bol nutný vymodelovať takým spôsobom, aby obsahoval viac tiel (tzv. viacte-lový diel).

Všetky telá bolo potrebné uložiť do formátu .STL. Materialise vyžaduje nahratie všetkých súborov naraz. Následne sa vyberú telá, na ktorých má byť mriežková štruktúra.

Mriežkovaná štruktúra bola použitá vzhľadom na obtiažnosť výroby, ktorá sa nedá dosiahnuť klasickou konvenčnou cestou. Bolo nutné sa vyvarovať ostrým hranám, ktoré môžu spôsobiť turbulencie.



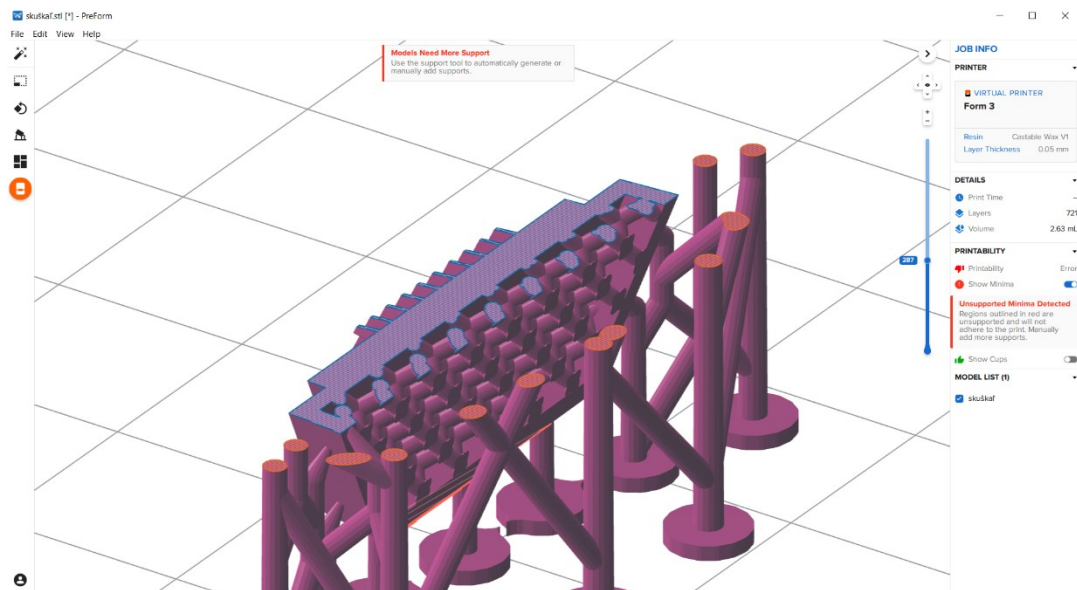
Obrázok 12 Vytvorenie mriežkovanej štruktúry pomocou programu Materialise Magics

Optimalizácia

V tomto kroku bola optimalizovaná mriežkovaná štruktúra. Mriežkovaná štruktúra nemôže byť moc jemná a hustá, aj cez to, že tlačiareň zvláda veľmi jemné details. Bolo prihliadnuté na hranicu tlačnosti. Z pôvodnej 3 mm hrúbky steny bolo zmené na 5 mm hrúbku steny štruktúry.

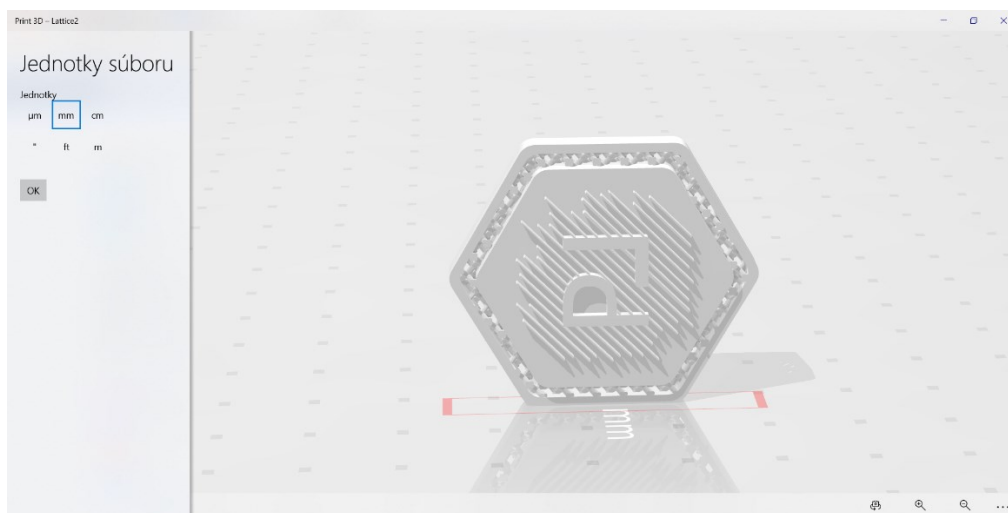
Kontrola

Nevyhnutným krokom pri realizácii modelu je kontrola, teda vylúčenie akýchkoľvek chýb pri tlači. Vylúčiť prípadný problém bolo možné pomocou softwaru PreForm, ktorým je nasimulovaná tlač po jednotlivých vrstvách



Obrázok 13 Simulácia tlače

Finálny CAD model pre 3D tlač



Obrázok 14 Finálny model pre 3D tlač

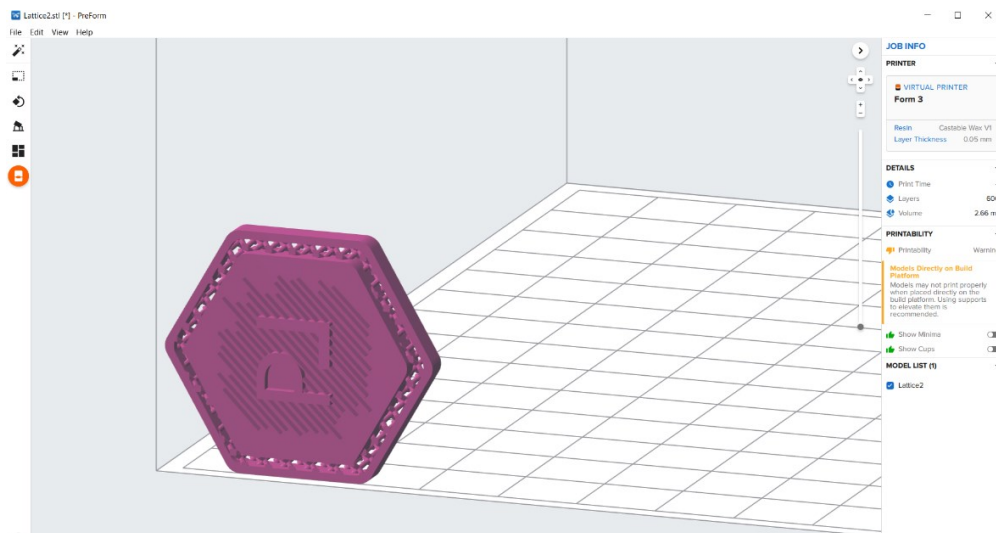
4.2.2 Processing

Tlačové údaje

Ako bolo spomenuté v kapitole Prvé vytvorenie konceptu, model bolo nutné uložiť do formátu .STL alebo .STEP. Sú to univerzálne formáty súborov, ktoré možno otvoriť v rôznych programoch a pracovať s nimi.

Pod tlačové údaje spadajú tieto údaje:

1. Výber aktuálnej tlačiarne, ktorá bude použitá na tlačenie.
2. Zvolenie správneho materiálu a k tomu aj patričnú živicovú nádrž. Pri nevhodnom výbere materiálu alebo živicovej nádrže nemusí správne prebehnúť proces tlače, čiže nemôže sa kombinovať iný materiál s inou živicovou nádržou.



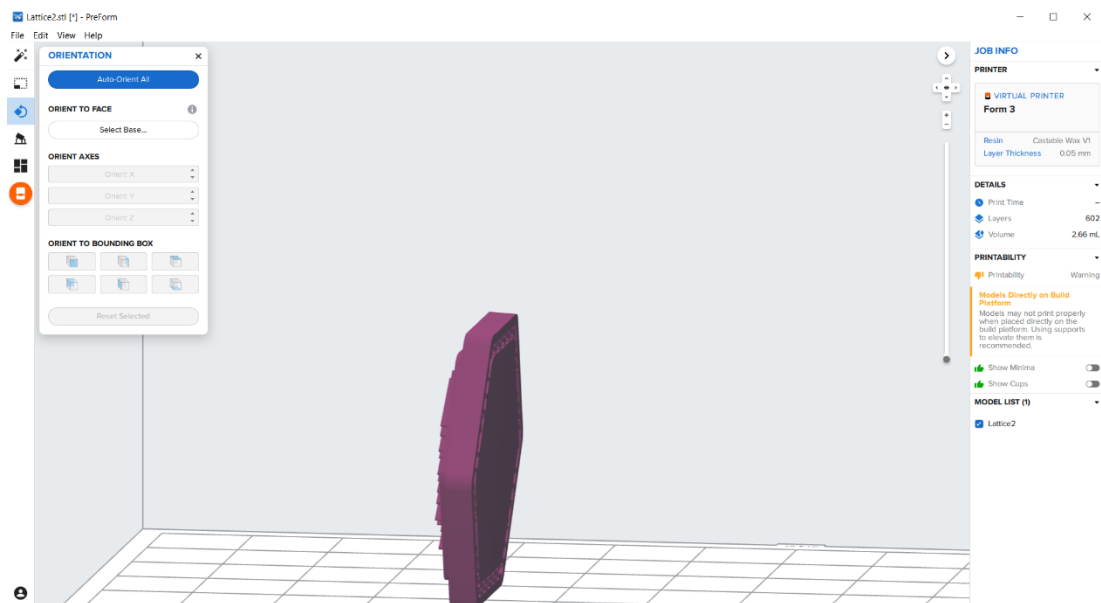
Obrázok 15 Pracovné prostredie softwaru PreForm

Parametre – orientácia modelu, podpory

Ďalším krokom bolo orientovanie modelu (orientation). Je to veľmi dôležitý krok z hľadiska procesu tlače, pretože nevhodná orientácia modelu môže viesť k zlyhaniu tlače.

Pre najjednoduchšie časti je orientácia menej kritická, ale keď sa časti stávajú zložitejšie, je potrebné zmeniť orientáciu. Tlač veľkých plochých povrchov rovnobežne so zostavou platformy vystavuje tieto povrchy výrazným silám v procese odlupovania a prúdenia a vyžaduje si, aby boli masívne podpory úspešné. [7]

Najjednoduchšou fixáciou je naklonenie takých povrchov tak, že iba časti povrchu sú vystavené tlačovým silám naraz. duté predmety môžu zachytávať živicu, ak je otvor predmetu orientovaný nad živicovou podložkou. Akonáhle je dutá časť utesnená, môže sa živica zachytiť vo vnútri, deformovať konečný povrch a pridať hmotu počas procesu odlupovania / toku. [7]



Obrázok 16 Použitý krok orientácia modelu

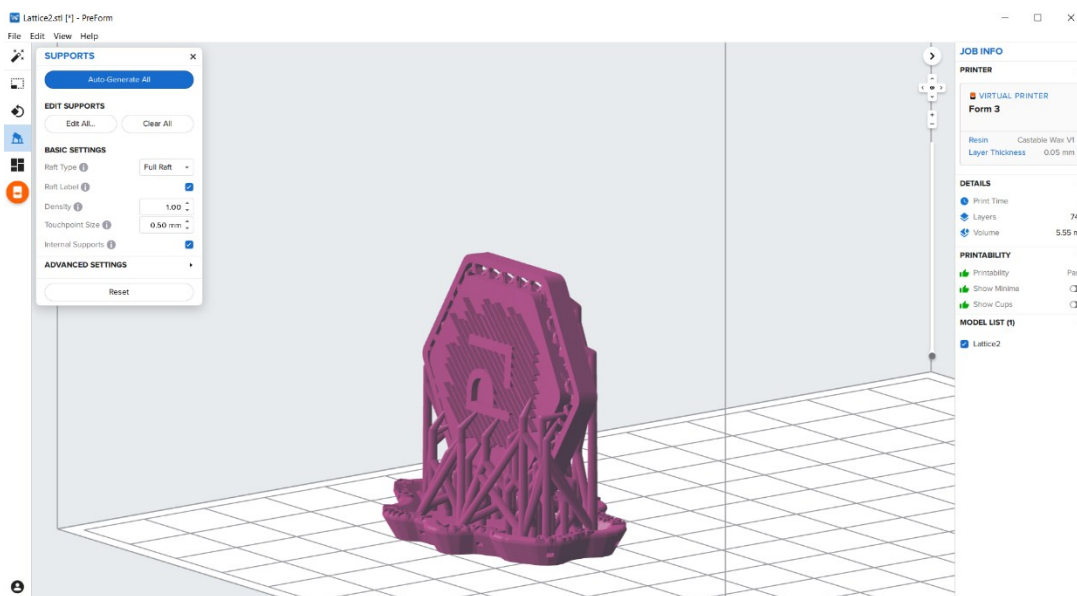
Jeden z najdôležitejších krokov pre dosiahnutie úspešnej tlače je krok podpory (supports). Sú 3 možnosti vytvorenia podpôr:

1. Program PreForm automaticky vytvorí podpornú štruktúru na základe parametrov vybraných pre hustotu a veľkosť dotykového bodu.
2. Program PreForm automaticky vytvorí podpornú štruktúru a umiestnenie, veľkosť a počet dotykových bodov môžeme upravovať pomocou tlačidla „Edit“, ktoré je možné vidieť v dialógovom okne.
3. Ako posledná možnosť je vytvoriť si vlastnú podpornú štruktúru podpory. Drobná a ľahká štruktúra šperkov môže umožňovať zjednodušené podpory.

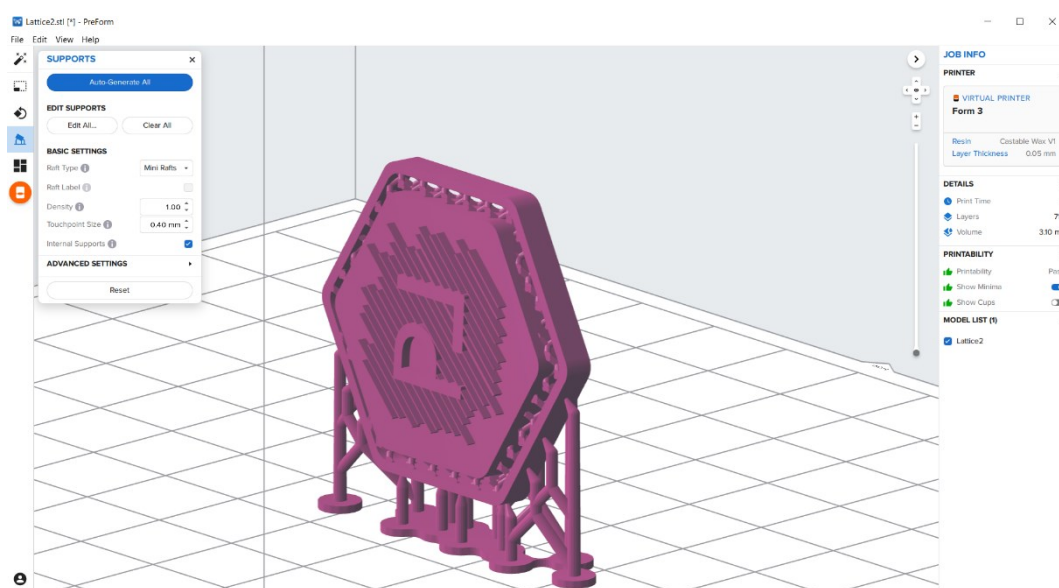
Pre model v tejto práci bolo vytvorené pomocou programu PreForm vlastná podporná štruktúra, pretože program niekedy nie je až taký presný. Pri vytváraní podpôr môže

zasahovať aj do kritických častí modelu a to by viedlo pri dodatočnom spracovaní k veľkým problémom.

Odstránenie podpôr z veľmi jemných častí alebo z častí, ktoré sú štruktúrované, môže viesť k utrhnutiu alebo veľmi veľkému poškodeniu povrchu aj pri správnom dodatočnom spracovaní.



Obrázok 17 Model s automatickými podporami



Obrázok 18 Model s ručne vytvorenými podporami

Simulácia tlače

Ako bolo spomenuté v odstavci Kontrola, na obr. 13 je znázornená simulácia tlače, kde nie sú zistené žiadne chyby pre tlač.

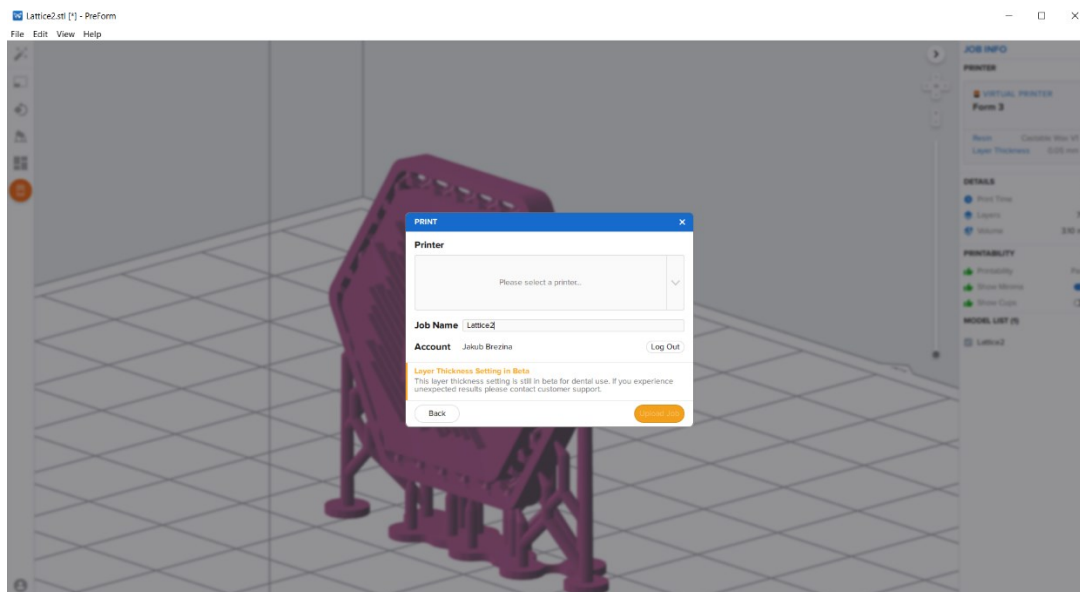
3D tlač

Pre šperky s jemnými detailmi sa odporúča výška vrstvy 25 mikrónov. Čím je výška vrstvy tenšia, tým sa viac vrstiev vytvorí. Vďaka nej sa dosiahnu jemnejšie detaily, ale dlhší čas zostavenia. Počas laserového tvrdenia živica silne priľnaví k stavebnej platforme a následným vrstvám živice a slabo prilieha k opticky číremu silikónovému povrchu nádrže na živicu. Hrúbka každej stavebnej vrstvy je určená vzdialenosťou medzi dvoma povrchmi. Napríklad, keď nastavím hrúbku vrstvy 50 mikrónov v PreForm, zariadenie použije túto hrúbku na nastavenie vzdialenosti medzi povrchmi pre každú nasledujúcu vrstvu. [7]

Pri vytváraní šperkov bolo potrebné venovať veľkú pozornosť hrúbke a hmotnosti steny. Šperky sú zvyčajne navrhnuté tak, aby udržali nízku hmotnosť v dôsledku nákladov na materiály (drahé kovy) a nositeľnosť, pričom však dávajú zdanie upokojujúceho objemu. Udržiavanie pomerne nízkej hmotnosti a hrúbky steny pomáha dosiahnuť vydarené výtlačky v kratšom čase a vyžaduje pri stavbe menej živice. [7]

Ďalší dôležitý parameter je gravírovanie do šperkov. Ak sú obrázky a text dostatočne veľké, nemalo by to spôsobiť žiadne komplikácie v priebehu tlače. Je potrebné nájsť najlepšie riešenie vo veľkosti, hrúbke a typu písma, ktoré bude pre chod tlače bezproblémové. [7]

Pre uvedený model bolo zvolené veľkosť písma 10 mm. Nasledujúcim krokom bolo už len nahrať tlačovú úlohu do tlačiarne pomocou USB kábla.



Obrázok 19 Nahratie súboru do tlačiarne

4.2.3 Postprocessing

Odstránenie podpôr

Model bol po vytlačení zbavený zbytkovej živice a odstránili sa podpory. Podpory boli navrhnuté tak, aby nezasahovali kritické miesta dielu a aby sa mohli ľahko odstrániť. Pomocou špeciálnych nožníc bolo zbavené podpôr z vytlačeného modelu.



Obrázok 20 Odstránenie podpôr [1]

Oplach + vytvrdenie

Po vytlačení bolo nutné zbaviť vytlačený model zvyšku živice. Na očistenie modelu a stavebnej platformy slúži tzv. Form Wash. Je to čistiaca stanica, do ktorej sa naleje približne 10 l IPA. Platforma sa vsunie do čistiacej stanice a podľa určeného času, ktorú bolo nevyhnutné dohľadať z príručky od výrobcu.

Pre odlievateľnú voskovú živicu bol nastavený čas pre čistenie 10 minút. Následne bolo nevyhnutné ešte dôkladne očistiť model v 90% IPA pomocou čistiacej súpravy 5 minút v čistom IPA. Po uplynutí času bolo potrebné časti úplne vyschnúť. Pred dodatočným vytvrdením je požadované mať model úplne odparený od všetkého IPA.



Obrázok 21 Ručná čistiaca súprava Formlabs [9]



Obrázok 22 Čistiaca stanica Formlabs [10]

Väčšinu materiálov je nutné po čistení vytvrdiť, to ale neplatí pre odlievateľnú voskovú živicu, pretože kým po vytvrdnutí odlievateľných voskových častí by nemali ovplyvňovať zlievateľnosť, dodatočné vytvrdzovanie môže časti mierne zmenšiť, čo môže spôsobiť zdeformovanie. [8]



Obrázok 23 Vytvrdzovacia stanica Formlabs [11]

Brúsenie

Po odstránení podpôr vznikli tzv. krátery, ktoré boli odstránené brúsením. Povrch bol zbavený nerovností a vybrúsený do hladka.

Odlievanie

Pri procese odlievania je dutá forma vytvorená z ručne tvarovaného alebo 3D vytlačeného vzoru. Master je ponorený do žiaruvzdorného odliatku, ktorý zasychá a stvrdne. Vosk alebo 3D vytlačený vzor je spálený a zanecháva negatívnu formu vzoru. Do tejto dutiny sa naleje kov, aby sa vytvoril finálny diel. [8]

Príprava formy:

1. Lejaciu banku pripojíme k základnému modelu. [8]



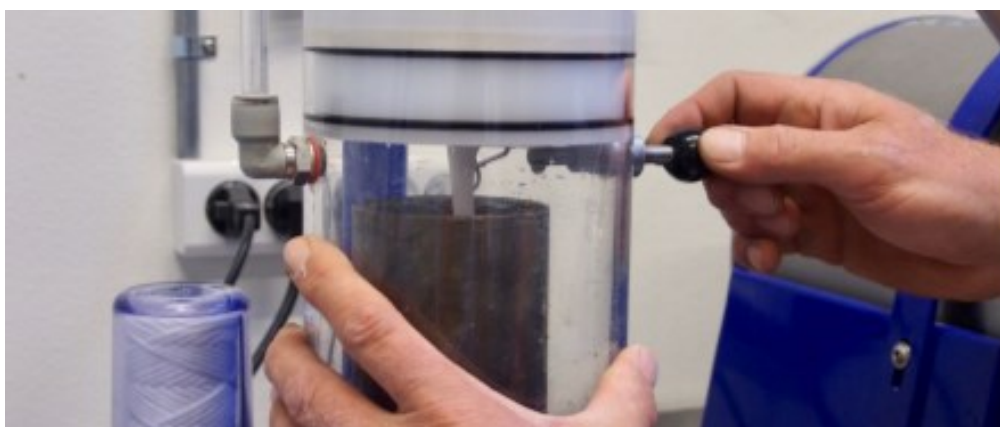
Obrázok 24 Pripojenie banky k modelu [8]

2. Zmiešame investičný prášok so studenou destilovanou vodou. Pridanie menšieho množstva vody do zmesi môže zvýšiť investičnú silu, aj keď viskozita sa taktiež zvýši (je ju ťažšie ovplyvniť). Miešame pomalou rýchlosťou dovtedy, kým nie je prášok úplne vlhký. [8]



Obrázok 25 Miešanie prášku a destilovanej vody [8]

3. Investičnú zmes pomaly nalievame do formy. Jemný prúd nevytvára bublinky. Ak by sa vyskytli akékoľvek bublinky, je potrebné použiť vákuovú komoru. Zmes necháme vytvrdnúť a vysušiť. [8]



Obrázok 26 Nalievanie zmesi do formy [8]

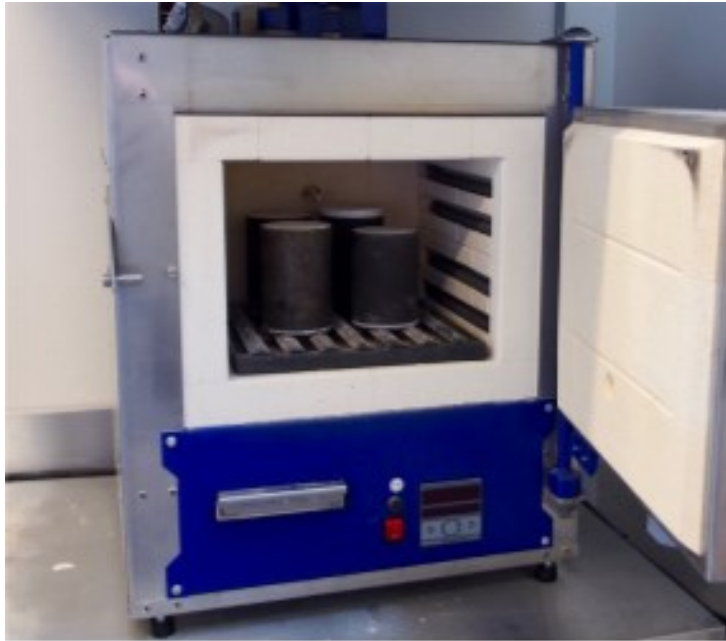
4. Model opatrne vyberieme z formy a necháme ho stáť na mieste 2 až 6 hodín bez vibrácií. [8]



Obrázok 27 Forma na odlievanie [8]

Vyhorenie a odlievanie:

1. Vložíme odlievaciu formu do spaľovacej pece. Pec zahrejeme na požadovanú teplotu definovanú výrobcom. [8]
2. Formu necháme odstáť 5 hodín, aby sme zabránili prasknutiu vnútornej formy, keďže sa voda vnútri rozťahuje a mení na paru. [8]



Obrázok 28 Pec [8]

3. Vyberieme formu z pece a odlejeme kov. Po odlievaní som uhasil formu vo vode. Kompatibilita s kovmi je rôzna, pretože každá investícia vyžaduje iné stupne teplotnej odolnosti. Odlievateľný vosk vyžaduje na dokončenie vyhorenia teplotu najmenej 732 °C. [8]



Obrázok 29 Odlievanie kovu [8]



Obrázok 30 Schladenie formy vo vode [8]

5 ZÁVER

3D tlač je aditívny spôsob výroby, kde postupným nanášaním a spájaním materiálu po vrstvách vzniká navrhnutý objekt, na základe CAD modelu je možné vyrobiť súčasti a diely, ktoré by nemohli byť vyhotovené žiadnou inou výrobnou technológiou. Z dôvodu zložitosti rôznych štruktúr a objektov je veľmi obtiažne, až nemožné vyrobiť ich konvenčnou cestou ako napr. sústružením, frézovaním apod. Ďalšia oblasť, kde je možné využiť 3D tlač je oprava alebo celková rekonštrukcia požadovaného objektu. K tomuto práve slúži spomínaný CAD model, vytvorený pomocou počítača. Tvar dielov alebo celkovej súčasti je získavaný pomocou 3D laserového skenovania.

Cieľom bakalárskej práce bola výroba šperku pomocou technológie SLA. Objekt bol vytlačený na 3D tlačiarňi Form 3 od spoločnosti Formlabs. Táto tlačiareň používa fotopolymernú kvapalnú živicu na vytváranie objektu a za pomoci laseru vrstvi vrstvu po vrstve materiál. Na môj diel bola použitá odlievateľná vosková živica s obsahom 20% vosku. Tento materiál má výhodu oproti klasickým fotopolymerným živiciam v tom, že po vytlačení nie je nutné objekt ďalej vytvrdzovať. Ďalšia výhoda materiálu je to, že je možné z neho odlievať kov.

Z dôvodu svetovej pandémie COVID – 19 som sa nemohol podieľať na výrobe navrhnutého modelu. Táto bakalárska práca sa v praktickej časti zaoberá skôr popisom technologického postupu, ktorý je možno použiť na rôzne aplikácie s odlievateľnou voskovou živicom. V SLA technológii je veľký potencionál, pretože práve firma Formlabs, ktorá vyvinula nosné tampóny pre testovanie COVID – 19 má veľkú zásluhu vo svetovom zdravotníctve. Sú navrhnuté tak, aby neboli použité žiadne podpory, tým pádom pri dodatočnom spracovaní sa nezasiahne do modelu a tyčinka ostane neporušená.

Centrum 3D tlače Protolab sa taktiež podieľal na výrobe nosných tampónov, ktoré boli veľkou pomocou pre Fakultnú nemocnicu v Ostrave. Tyčinky boli vyrobené z biokompatibilného materiálu a to bola zubná živica (Surgical Guide Resin), ktorá nie je zdraviu škodlivá a nespôsobuje žiadne problémy v kontakte s kožou.

Tento výrobný proces má veľmi dobrú perspektívu do budúcnosti, pretože výroba šperkov pomocou 3D tlače, je už témou pre rôzne firmy, ktoré túto technológiu využívajú. Pri hromadnej výrobe sa môže zefektívniť proces výroby a taktiež z ekonomického hľadiska to bude výhodnejšie. Výroba šperkov klasickou metódou je veľmi precízna práca, ale pomocou

3D modelu, ktorý môže byť navrhnutý pomocou počítača alebo za pomoci 3D skeneru získať dáta modelu a uľahčiť výrobu za pomoci 3D tlačiarne.

Je tu aj námet na diplomovú prácu, pretože firma Formlabs stále vyvíja živice a je tu mnoho aplikácií, kde možno uplatniť práve SLA technológiu. Mriežkované štruktúry, rôzne futuristické designy, tlač veľmi jemných detailov a širokú škálu odvetví. 3D tlač stále napreduje a firmy čoraz viac využívajú možnosti a výhody 3D tlače a za pomoci Centra 3D tlače Protolab je možné sa spojiť s rôznymi firmami a vytvoriť zaujímavú tému, ktorá by sa dala zrealizovať a publikovať.

Rád by som poďakoval svojmu vedúcemu bakalárskej práce Ing. Marekovi Pagáčovi, Ph.D. za podnetné konzultácie, vecné rady a profesionálne vedenie pri spracovávaní mojej bakalárskej práce a taktiež za možnosť zoznámiť sa s Centrom 3D tlače Protolab.

Chcel by som sa poďakovať aj mojej rodine za morálnu podporu počas vypracovávania bakalárskej práce, ale aj počas celého štúdia.

6 ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

[1] Introduction to SLA 3D printing | 3D Hubs . 3D Hubs | *On-demand Manufacturing: Quotes in Seconds, Parts in Days* [online]. Copyright © 2020 3D HUBS B.V. All rights reserved. [cit. 06.05.2020]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-sla-3d-printing/>

[2] SLA vs. DLP: Guide to Resin 3D Printers | Formlabs. *High Resolution SLA and SLS 3D Printers for Professionals* | Formlabs [online]. Copyright © Formlabs [cit. 06.05.2020]. Dostupné z: <https://formlabs.com/blog/3d-printing-technology-comparison-sla-dlp/>

[3] Post processing for SLA printed parts | 3D Hubs . 3D Hubs | *On-demand Manufacturing: Quotes in Seconds, Parts in Days* [online]. Copyright © 2020 3D HUBS B.V. All rights reserved. [cit. 06.05.2020]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/post-processing-sla-printed-parts/>

[4] 3D Printing Materials for Professionals | Formlabs. *High Resolution SLA and SLS 3D Printers for Professionals* | Formlabs [online]. Copyright © Formlabs [cit. 06.05.2020]. Dostupné z: <https://formlabs.com/materials/standard/>

[5] 3D Printing Materials: Engineering Resins | Formlabs. *High Resolution SLA and SLS 3D Printers for Professionals* | Formlabs [online]. Copyright © Formlabs [cit. 06.05.2020]. Dostupné z: <https://formlabs.com/materials/engineering/>

[6] Using Castable Wax Resin. *Using Castable Wax Resin* [online]. 2019 [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: https://support.formlabs.com/s/article/Using-Castable-Wax-Resin?language=en_US

[7] Jewelry 3D Printing: Basic Design Parameters, Supports, and Orientation. *Jewelry 3D Printing: Basic Design Parameters, Supports, and Orientation* [online]. 2017 [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: https://3d.formlabs.com/rs/060-UIG-504/images/Jewelry-3D-Printing-Basic-Design-Parameters-Supports-Orientation.pdf?mkt_tok=eyJpIjoiTjJObFpEZGpOVGcxTURjeCIIsInQiOiJVNktUTExnbTkwMjAyV1VEWkdJZG1TOEF-GUVpkRjBcL2Y1dlpOTnlrWWWhPeEFHSDJHN2lsaXc0VG9Cc2xPaT-BEYVwvZ1JHZENuWmpXZ2ZVbmcrUXl4QkttY3d1MjZndEZxOFI5aldDZ1IyN3Vye-VIGVVRkaGcyQlhua1N6U2VIMHFjIn0%3D

[8] Introduction to Casting for 3D Printed Jewelry Patterns. *Introduction to Casting for 3D Printed Jewelry Patterns* [online]. 2019 [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: https://3d.formlabs.com/rs/060-UIG-504/images/WP-EN-Introduction-to-Casting-for-3D-Printed-Jewelry-Patterns.pdf?mkt_tok=eyJpIjoiTURJMVIUSXpZbUZsTnpWaCIsInQiOi-JwaVJpSGROdUFSRHlSe-itFcHhRV3o4ajZUcVNOWIBHS3NQWFBaMWR1R3daZ2tjUWs3ZjhHUDRDYThRc1pRV1Jnc0ZNM3Uy-WDNCSGJcL1lzRUNcL0tWMEpKTE83cU40cjFhbJnc3B1WGU1NFcwa-GtiTHBGNFVHTVB4M2FEXC90XC9MK2UifQ%3D%3D

[9] Form 3 Finish Kit (ruční čistící sada) - 3Dwiser. *#1 eshop pro 3D tisk - 3Dwiser* [online]. Dostupné z: <https://eshop.3dwiser.com/prislusenstvi-sla-dlp/form-3-finish-kit/>

[10] Form Wash and Form Cure: Automated Post-Processing | Formlabs. *High Resolution SLA and SLS 3D Printers for Professionals | Formlabs* [online]. Copyright © Formlabs [cit. 06.05.2020]. Dostupné z: <https://formlabs.com/wash-cure/>

[11] Form Cure | Formlabs. *High Resolution SLA and SLS 3D Printers for Professionals | Formlabs* [online]. Copyright © Formlabs [cit. 06.05.2020]. Dostupné z: <https://formlabs.com/store/form-cure/>

[12] Compare Formlabs SLA 3D Printers Tech Specs | Formlabs. *High Resolution SLA and SLS 3D Printers for Professionals | Formlabs* [online]. Copyright © Formlabs [cit. 06.05.2020]. Dostupné z: <https://formlabs.com/eu/3d-printers/form-3/tech-specs/>